

# 宇宙実験におけるデータ転送 テレサイエンスとリアルタイム

The Data Communication on Space Experiment  
Telescience and Real Time Data Access

小 林 英三郎\*  
Hidesaburo Kobayashi

## 宇宙で実験を行う

1969年7月20日に達成されたニール・アームストロングの月面着陸から25年、冒険の時代であった宇宙への挑戦は、微小重力を有効に利用する科学計画へと展開してきた。スペースシャトルやロケットによるスペースラブを利用したものから恒久的施設である宇宙ステーションの利用へとその科学の場を広め、多くの可能性を持つものに転換している。宇宙実験も初期にはロケットを利用したものが多く、その飛行時間は短いものであったが、ライフサイエンスで利用する長時間の実験には専らスペースシャトルが使われるようになった。1984年4月12日にスペースシャトルの初飛行がコロンビア号で開始されてから宇宙での実験機会は増加した。1992年9月12日に開始したエンデバーによるスペースラブでは日本人初の搭乗科学技術者（PS: Payload Specialist）毛利衛博士により第一次材料実験（プロジェクトはふわっと'92とも呼ばれている）が行われ、多くの宇宙科学実験の成果を上げている。

1994年7月8日の第2次国際微小重力実験室（IML-2: International Microgravity Laboratory No.2）のコロンビア号の飛行は63回目のスペースシャトルの飛行となり、日本人初の女性搭乗科学技術者向井千秋博士が搭乗した。この国際微小重力実験室計画は米国航空宇宙局（NASA: National Aeronautics and Space Administration）が国際協力により推進するスペースシャトルに搭載する宇宙実験室スペースラブを用いた微小重力実験のシリーズ化されたものであり、第2回目のIML-2では13カ国の科学者が提案する82の実験テーマが行われた。

宇宙は生命科学にとって未知なことが多く、生物の発生や分化を始めとし、微小重力環境を利用した生命現象の研究課題が展開されている。我々はこのIML-2に「電気泳動による線虫染色体

---

\* 城西大学理学部

DNA の分離」を提案し、スペースシャトル・コロンビアのスペースラブで宇宙実験を行った。宇宙環境での実験プロセスを追いながら、宇宙と地上とのリアルタイム通信を取り上げ考察する。

## 1. 宇宙実験「電気泳動による線虫染色体 DNA の分離」

提案したテーマは電気泳動原理を用い遺伝物質である DNA を効率的に分離するための基礎実験である。電気泳動は荷電物質を高電圧下で移動させ、個々の移動度の差により分離するものである。今回使用した無坦体電気泳動 (FFE: Free Flow Electrophoresis) は、分離槽に充填物を使わずに泳動を行うので、低分子物質はもとよりタンパク質、核酸などのような高分子をはじめ、超分子や細胞顆粒などの巨大サイズの物質の分離には特に有用である<sup>(1)</sup>。FFE は CFFE (Continuous Free Flow Electrophoresis) と呼ばれ、電気泳動原理に基づく分離方法の中で、大量処理にはもっとも適した方法であり、産業界で要求する規模の物質分離に対応することも出来る<sup>(2)</sup>。我々は FFE で pH 勾配を形成する分離原理 (IEF: Isoelectric Focusing)<sup>(3)</sup> を用い染色体 DNA の分離を目的としている。地上では pH 勾配を形成させるため高電圧を与えると、分離槽内で起こる熱対流は避けることが出来ず、低電圧では長時間の泳動を余儀なくされる。これに対し微小重力環境下では熱対流がないので高電圧で電気泳動が可能であり効果的な電気泳動分離が期待出来る。また比重差により沈降を起こすサンプルも安定に取り扱える利点も見逃すことが出来ない。

今回の実験では染色体 DNA の試料として線虫 (*Caenorhabditis elegans*) を選んだ。線虫 *C. elegans* は細胞系統樹が完成しており、動物の基本体制である生殖機能、神経系、筋肉、消化器官などを有する<sup>(4)(5)(6)</sup>。*C. elegans* の染色体は雌雄同体で 5 AA+XO であり、また半数体 DNA 含量は 100 Mb でヒトの 1/30 であるので、ヒューマングеноム計画に先駆け、完全な DNA 配列を決める適切な候補となるべき生体でもある。さらに *C. elegans* の遺伝子の多くは広範囲にわたり哺乳類の遺伝子に類似していることも、この生物を先駆候補として取り上げる理由である。

## 2. 無坦体電気泳動装置 (FFEU: Free Flow Electrophoresis Unit) データの転送

今回の計画で使用した電気泳動装置 FFEU は宇宙開発事業団 (NASDA: National Space Development Agency of Japan) が開発し、三菱重工業神戸造船所で製作された。この電気泳動装置をスペースシャトルコロンビアのスペースラブに搭載し、地球を周回する軌道飛行で生じる微小重力下で電気泳動を行った。

スペースラブでの搭載位置は〈図 1〉に示すようにラック番号 3 の下部である。本装置は電気泳動本体とサブユニットからなり〈図 2〉、本体には電気泳動の電極液、電気泳動緩衝液、サンプル導入ポンプ、また、サブユニットは電気泳動のモニター信号の表示画面と電気泳動緩衝液タンクが収納されている。これらの機能は全て CPU: Z80 で制御されており、ハウスキーピングデータおよび電気泳動状態を判断するディテクターの信号は後述するスペースラブの DIU 経由で地上に送

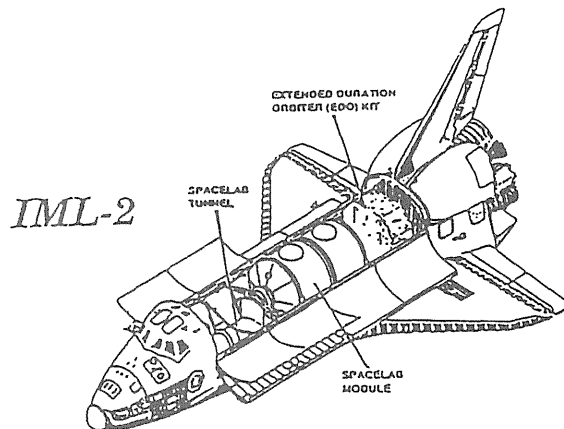
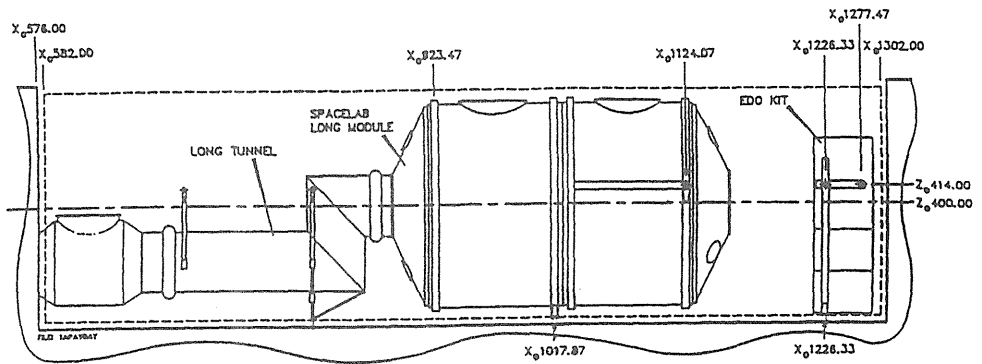
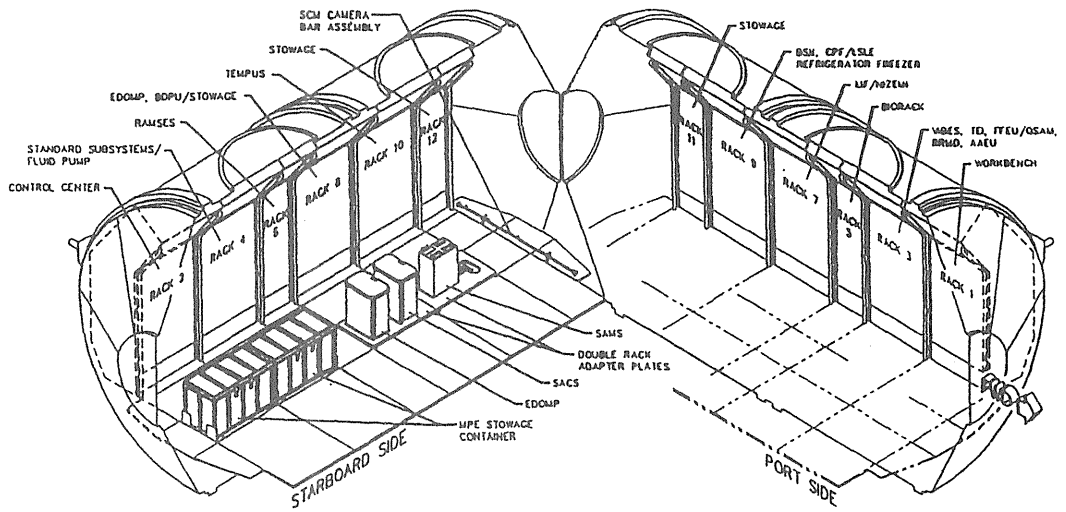


図1 スペースシャトルのスペースラブ

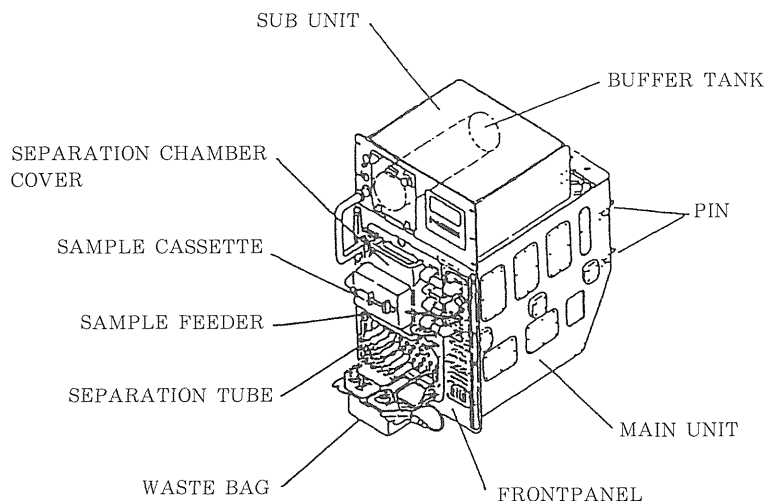


図2 無担体電気泳動装置 FFEU

られる。32ビット機が主流になった現在では、このCPUは少し時代遅れであるが、FFEU装置が1979年から始まった第一次材料実験（FMPT: First Material Processing Test）のために開発されたこと、NASAの安全基準に合格するために多くの検査項目に渡る実験検証が必要で、新しい機種を導入するには時間がかかることなどが反映されている。スペースシャトルという現代科学の最先端の技術を集積しているシステムとはちぐはぐな面であるが、1986年1月28日のチャレンジャの事故などのことを考えると、有人宇宙飛行の安全基準に関してかなり慎重にならざるを得ない。このような事情が背景にあるので、軌道上実験の計測データの2次の処理は地上で行うことになった。さらに、軌道上で実験を行う科学者は電気泳動の専門家ではないので、実験進行と共にリアルタイムで地上から指示を出す必要がある。

軌道高度300 kmの円軌道を飛行し、約90分の周回周期で地球を回るスペースシャトルからのデータおよびビデオ信号のダウンリンクを〈図3〉に示す。スペースシャトルからの信号は、追跡データ中継衛星（TDRS）で受け、ホワイトサンズの地上局（TDRSS）へ送られ、さらに米国内通信衛星（DOMSAT）を経由してマーシャル宇宙飛行センター（MSFC）へ送られる。MSFCはスペースシャトルの実験運用の管理基地で実験研究者が待機しており、ポック（POCC: Payload Operations Control Center）と呼ばれている。この間のデータの流れの概要を〈図4〉に示すが、スペースシャトルでの実験データは約50 Mのサイズで地上へ送られており、POCCではHRDM、DDS、IFTEを次々経由して電気泳動のモニターであるFAM（FFEU Absorption Monitor）に到達する。地上基地からスペースシャトルには同じ経路を逆に辿るのであるが、POCCの管制官の許可をもらい直接搭乗科学技術者と音声交信が出来るほかFAXによる指示もできる。

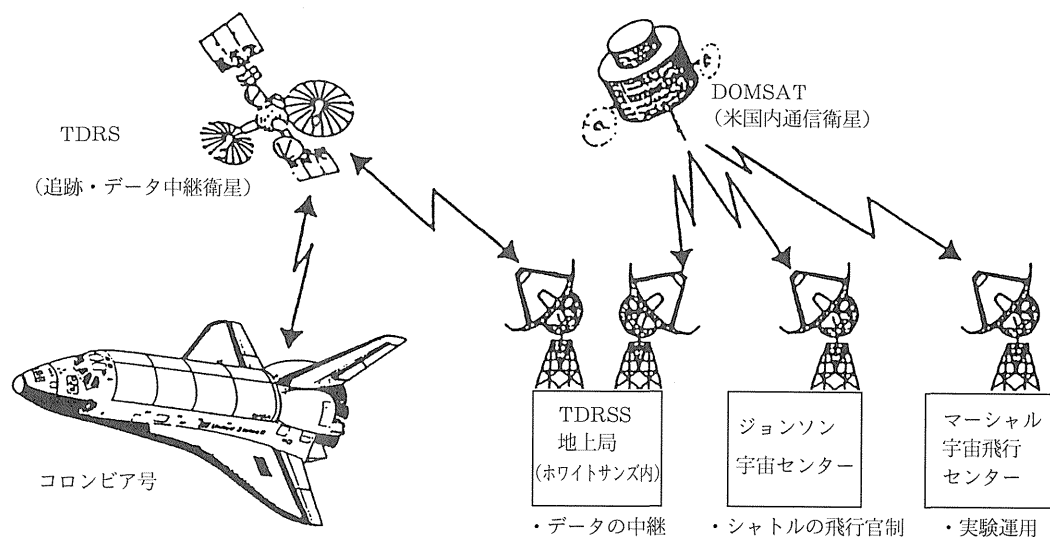


図3 データ転送システム概要図

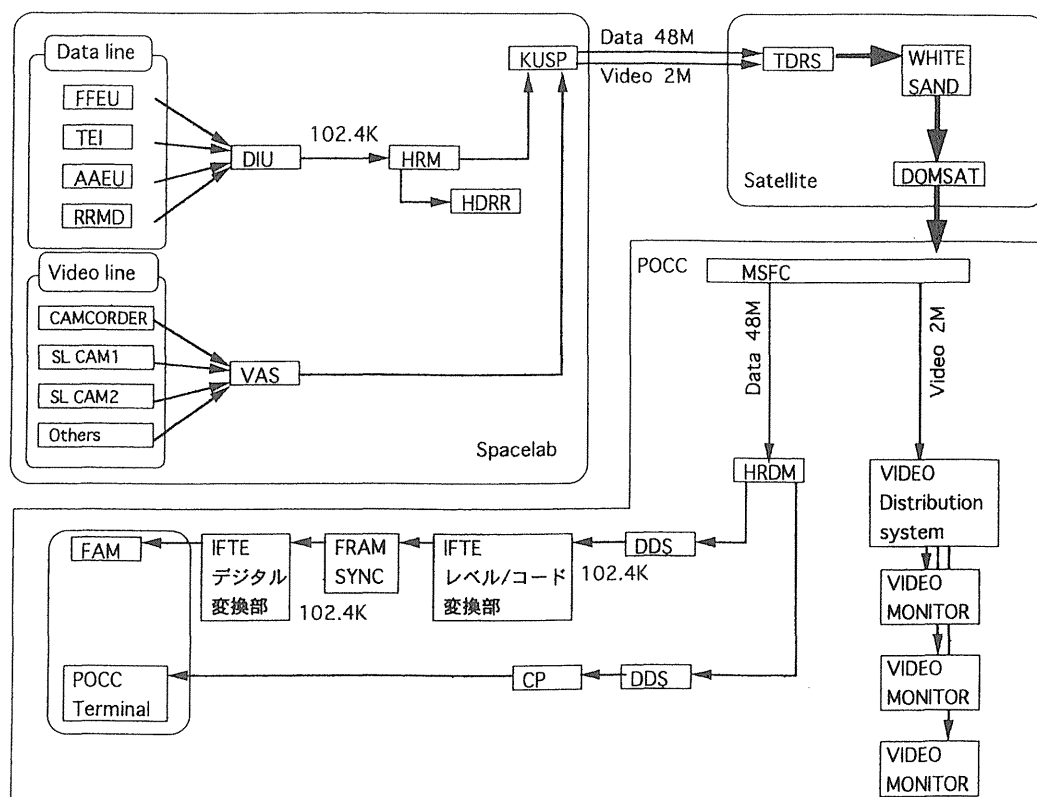


図4 スペースラブからPOCCへのデータダウンリンク

1992年の第一次材料実験のために使用されたFAMは電気泳動状態を10秒毎に1回1画面だけディスプレイで観測することが出来るのみで、経時的記録は全てプリントアウトするものになっていた。今回は電気泳動の無加電および加電状態のサンプル流下安定性、過渡現象およびサンプルの分離状況などを的確に判断することを目的にした3Dエレクトロフェログラム(3DEP)を開発した。

### 3. 3Dエレクトロフェログラム(3DEP: Three Dimentional Electropherogram)

FFEU装置は電気泳動分離槽(W 60 × H 100 × D 4 mm)の下部に配置され、両脇に取り付けられた電極間に512チャンネルのCCD吸光度モニター(254 nm)を装備している。この信号は先に述べたダウンリンクシステムを経由してIFTEに送られてくる。この信号を基に電気泳動状態の詳細を解析するため、我々は新たに3DEPプログラムを開発した<sup>(7)</sup>。このプログラムはFFEUサブユニットに用いられたX軸(検出器512チャンネル)、Y軸(吸光度)に加え10秒ごとのエレクトロフェログラムをZ軸(時間軸)とした3次元グラフで表わしたエレクトロフェログラム(3DEP)を表示するものである。マーカーサンプルを電気泳動した3DEPを〈図5〉に示す。このデータはIFTEのステータスを読み、有効データのみFAMのハードディスクに512チャンネル2バイトデータとして各ダウンリンクデータにラベルされているGMT(Greenwich

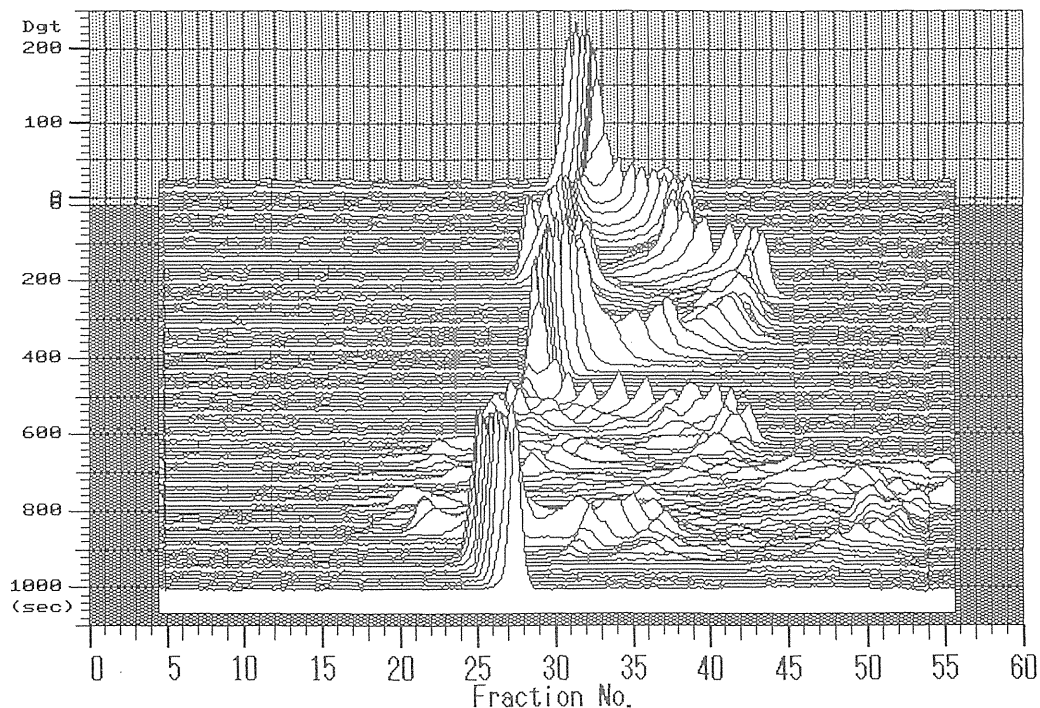


図5 加電条件を変えたマーカーの3DEP(宇宙実験では行うことが出来なかった。)

Meridian Time) と共に書き込み、その後再度ハードディスクから読み出し 3 DEP をディスプレイに描き出したものである。一見回りくどい方法に見えるが、追跡データ中継衛星の位置によっては通信回線が遮断すること、その他通信ラインの遮断に備え記録メディアへのアクセスを最優先した。また各データにラベルされた GMT はスペースシャトル運航データや G ジッタを計測する SAMS 等、他の計測機器で得られたデータの照合に使用した。

飛行実験に使用する実機である FFEU/FM および地上検証用装置 FFEU/BBM を使用し、データ取得から 3 DEP 表示までの実効速度を評価した。POCC での使用できるブースの広さや、NASA データラインとの適合性の検証しやすさなどを考慮し、FAM ハードウェアとしてノート型パソコン NEC/98 Note nx/e を採用した。1 回の電気泳動実験時間は 21 分で終了するので、本プログラムの 3 次元の表示フレームはあらかじめビュウポイントを決めて書き込んでおき、この上にディテクタデータを書き込む方式で表示実行時間の短縮を計った。データサンプリングから 3 DEP 表示までは 1.8 秒とダウンリンクデータ間隔 10 秒以内に納まり、余剰時間で 3 D エレクトロフロログラム画面のハードコピーを得ることができるなど、今回の目的に十分適合するものであった。

#### 4. 飛行実験

軌道上での電気泳動実験はスペースシャトルの打ち上げから 9 日目 (MET: Mission Elapsed Time) に行われた。計画では MET day 4 に行われる予定であったが、FFEU 本体の熱交換を行うスペースラブとの間に配管された冷却水循環系に気泡が入り、これを除去するため軌道上での修理 IFM (In-Flight Maintenance) が行なわれ、実験開始は大幅に遅れた。6 回にわたり軌道上で修理を行い水は循環するようになったが、実験時間は大幅に減少したので 3 回行う予定の実験計画を 1 回のみに変更した。実験結果の詳細は既に報告<sup>(8)</sup> してあるが、ディテクターの校正を行うために受けた信号は泳動槽内の異常を示していた。〈図 6〉この信号は電気泳動分離槽に気泡が入り、気泡表面での光屈折により異常を起こしたものと判断した。POCC では装置メーカーの対応策を参考にし、気泡除去のため洗浄モードの実行を搭乗科学者に要求したが、微小重力で発生した気泡は安定で FAM で観測する限り、その大きさ位置とも変化しないことが判明した。電気泳動槽内に気泡が滞留していると考えられたが、他の機能は正常であったのでサンプルを導入し電気泳動分離実験を実行した。3 DEP に現れた電気泳動分離状況は地上では得られなかった安定したものであった。〈図 7〉地上実験との比較を〈図 8〉に示すが、泳動状態の安定性は高く、また分離したマーカーピークの半値幅は約 1 mm と、加電による熱発生の影響の少なさを示していた。分離したサンプルは回収後冷凍し、スペースシャトル帰還後地上で PCR により DNA の検出を行った結果、微小重力下での電気泳動分離が良好に行われたことを示す 2 つのピークに分離していたことが判明した。循環水系の気泡除去作業のため電気泳動分離槽に気泡が混入していたのではある

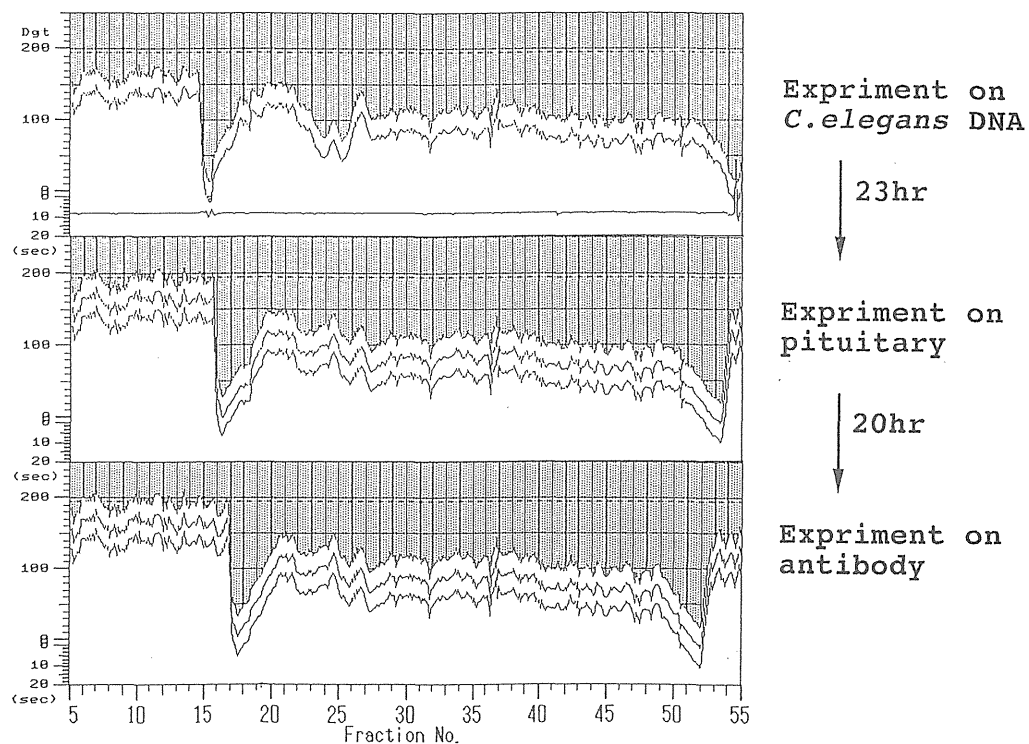


図6 FAMに現れた異常信号。左右のくぼみは気泡の界面により信号レベルが低くなっている

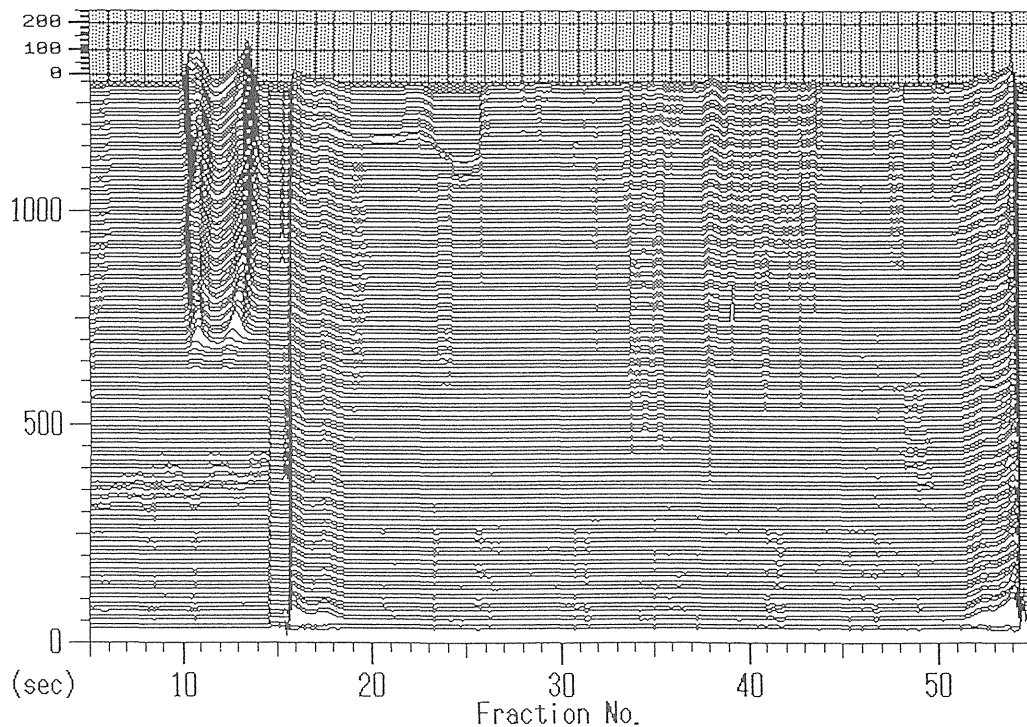


図7 宇宙実験での3 DEP。左の2本のピークはマーカー



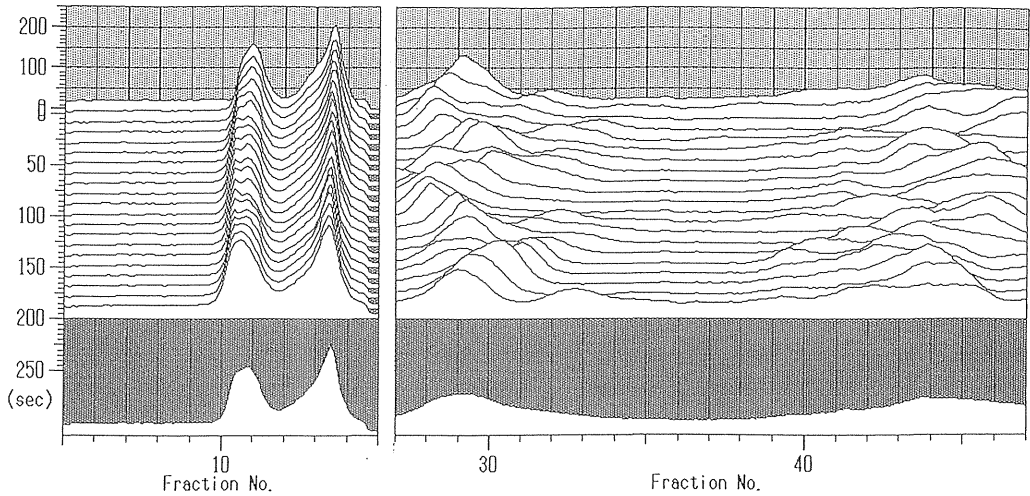


図8 地上実験と宇宙実験の比較。左の図は宇宙実験、右の図は地上実験での3 DEP

が、電気泳動実験操作そのものは部分的にはその目的が達成できた。

## 5. テレサイエンス

この実験を進行していく間、あらかじめ決められた手順書を大幅に書き換え、音声とFAXでスペースシャトルのクルーに要求を出した。実験の進行をPOCCのFAMでモニターしながら手順の再変更をくり返し、限られたクルータイムの間に目的の実験を達成するまでこの要求を続けた。気泡混入による実験の短縮と実験手順の変更を始めとし、電気泳動分離実験に使用するサンプルの選別、分離サンプルの回収対象になるポート番号の確認などクルーに要求する作業が地上予備実験でシュミレートしたものより大幅に増えた。スペースラブでの実験操作状況をビデオカメラで追うことが出来ればさらに的確な要求を迅速に出すことが出来たと思われる。

今回の実験計画は遠隔地で実験を行うテレサイエンスの簡単な例でもある。通常、宇宙実験では実験提案者が宇宙で実験実行者となることはない。今回の実験は比較的単純な操作が多く、クルーの地上訓練もそれほど多くの時間を必要としなかった。しかしながら今後生物試料を取り扱い、サンプルの分析条件を設定し、分析結果から次の実験計画を立てるなど、高度に複合化した研究を宇宙で行う際には地上の専門家達の指示をより多く仰ぐことになる。音声とFAXを主体にした交信は目の前に試料や装置を置いて実験しているときとは大きな相違がある。これは単に交信時間のずれがあるだけでなく、テレサイエンスが実験科学者の経験と判断に合ったものになっていないことによるものである。現在、テレサイエンスは専門分野となりつつあり、画像情報を大幅に取り入れ立体視が出来る顕微鏡下での実験や、動物の手術など高度の同時性および臨場性が必要な実験方法が展開されている<sup>(9)</sup>。これらの成果は単に宇宙と地上という限られら空間だけでなく、地上の遠隔地での医療診断や機材の有効利用など、サイエンス全体が空間を越えて実験結果と情報を交換する

時代になることを意味している。

21 世紀当初, 2001 年 1 月 29 日にはスペースシャトルの 108 回目の飛行には, 日本の宇宙ステーション建設飛行計画が予定されている。

## おわりに

今回のスペースラブでの実験に際して, IFM による装置の修復が出来なければ全ての実験機会が失われるところであった。IFM を成功させた Mr. Hieb と Mr. Halsell に, また実験手順を大幅に変更したにもかかわらずの確な実験操作を行ってくれた Dr. Thomas と Dr. Chiao の諸氏にまた IFM の実施を強く支援してくれた NASA の関係者に深く感謝します。なお, この研究の一部は宇宙化学研究所宇宙基地利用基礎実験費で賄われている。

## 〈参考文献〉

- (1) K. Hannig and Hans-G. Heidlich, "Free-Flow Electrophoresis: An Important Preparative and Analytical Technique for Biology, Biochemistry and Diagnostics", GIT VERLAG, Darmstadt, (1990)
- (2) M. J. Clifton and V. Sanchez, Chromatography (Tokyo), 16 (1995) 1-6
- (3) O. Vesterberg, Acta Chem. Scand. 23 (1969) 2653-2660
- (4) S. Brenner, "The genetics of *Caenorhabditis elegans*. Genetics", 77 (1974) 71-94
- (5) R. K. Harman, Genetics. In W. B. Wood (ed.), "The nematode *Caenorhabditis elegans*", Cold Spring Harbor Laboratory, 1988, pp.17-45
- (6) J. Sulston, In W. B. Wood (ed.), "The nematode *Caenorhabditis elegans*", Cold Spring Harbor Laboratory, 1988, pp.123-155
- (7) 小林英三郎, 石井直明, 広川健。IML-2 登載 FFEU の BBM を用いた電気泳動—第 2 次国際微小重力実験室計画 (IML-2) の地上基礎実験—。第 9 回宇宙利用シンポジウム, 東京。151-154 (1992)
- (8) 小林英三郎, 石井直明, 広川健, 長岡俊治。第 2 次国際微小重力実験室計画 (IML-2) 宇宙実験成果報告会 (予稿集) 電気泳動を用いた線虫 *C. elegans* の染色体 DNA の分離。p.31-34 (1995)
- (9) 渡邊悟ら, 宇宙医学実験におけるテレサイエンス実験技術の開発。平成 6 年度文部省科学研究費補助金研究試験研究成果報告書 (1995)